بررسی تجربی اثر موقعیت برجک زیردریایی بر رفتار جریان پایین‌دست آن*

شکراله محمد بیگی[۱]　　مجتبی دهقان منشادی[۲]　　علی سعیدی نژاد[۳]　　علی اکبر دهقان[۴]

چکیده *در این پژوهش اثر موقعیت برجک بر روی بدنهٔ زیردریایی بر رفتار جریان پایین‌دست برجک به‌صورت تجربی در تونل باد بررسی شده است. برای اندازه‌گیری میدان جریان سه‌بعدی از پراب پنج حفره استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که پراب پنج حفره به‌خوبی قادر به تعیین ویژگی‌های گردابهٔ نعل‌اسبی می‌باشد. هم‌چنین مشخص شد که گردابهٔ نعل‌اسبی با حرکت برجک به‌سمت دماغه کوچک‌تر می‌شود. هرچه برجک روی بدنه نزدیک به دماغه نصب شود، گردابهٔ وارد شده به جریان پروانه اثر نامطلوب کمتری دارد.*

واژه‌های کلیدی مدل زیرسطحی، برجک، تونل باد، گردابهٔ نعل‌اسبی، پراب پنج حفره.

Experimental Investigation of the Sail Position of a Submarine on the Downstream Flow Field

Sh. Mohammad Beigi　M. Dehghan Manshadi　A. Saeidinezhad　A.A. Dehghan

Abstract *The effect of sail position on the downstream flow field of the sail is investigated in the wind tunnel. A five-hole pressure probe is used to measure the 3D flow field. The investigation of the five-hole results shows that the five-hole measurements can determine the horseshoe vortex structure. Also, the results show that the horseshoe vortexes become smaller by forward moving of the sail on the body to the nose. Therefore, if the sail is mounted on the hull near the bow, the performance of the impeller increases and nose level decreases.*

Key Words Horseshoe vortex, Submarine model, Sail, Wind tunnel, Five-hole probe.

---

*تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۲/۲۸ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۸/۲۰ می‌باشد.

(۱) کارشناس ارشد، مجتمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین‌شهر، پردیس اصفهان.

(۲) نویسندهٔ مسئول: دانشیار، مجتمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، شاهین‌شهر، پردیس اصفهان.
mdmanshadi@alum.sharif.edu

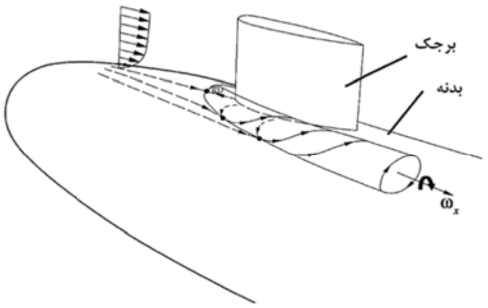
(۳) دکترا مکانیک، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد.

(۴) دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد.

مقدمه

زیردریایی یک وسیلهٔ نقلیهٔ زیرآبی است که شامل یک بدنهٔ اصلی و متعلقات مختلف می‌باشد. میدان جریان در اطراف بدنهٔ اصلی آن در زاویهٔ صفر تقریباً بدون جدایش و ایجاد گردابه می‌باشد. اما وقتی سایر قسمت‌های جانبی بر روی بدنهٔ آن نصب می‌شوند، شکل خطوط جریان بسیار تحت تأثیر شکل بدنه قرار می‌گیرد و میدان جریان پیچیده‌ای در اطراف آن ایجاد می‌شود. جریان‌های گردابی در اطراف بدنهٔ زیردریایی تأثیر به‌سزایی در عملکرد آن دارند. از جمله این گردابه‌ها، گردابهٔ نعل‌اسبی است که در محل اتصال برجک به بدنهٔ زیردریایی به‌وجود می‌آید. برجک زیردریایی دارای شکلی ایرفویل‌گونه است که مکانی برای ورود و خروج خدمهٔ زیردریایی و محلی برای قرارگیری برخی از تجهیزات کنترلی و مخابراتی در زیردریایی فراهم می‌سازد. برجک از نظر هیدرودینامیکی تأثیر به‌سزایی در تعادل و پایداری زیردریایی دارد. از این‌رو وجود آن بر روی بدنهٔ زیردریایی با طراحی‌های فعلی اجتناب‌ناپذیر است [۱]. در محل اتصال برجک به بدنهٔ اصلی زیردریایی گردابهٔ نعل‌اسبی تشکیل می‌شود. این گردابه تا منطقهٔ پروانهٔ زیردریایی امتداد می‌یابد و یک‌نواختی جریان پروانه را کاهش می‌دهد. در نتیجه حضور گردابهٔ نعل‌اسبی باعث افت راندمان پروانه و ایجاد نویز می‌شود. از این‌رو بررسی عملکرد گردابهٔ نعل‌اسبی و تغییر آن در اثر عوامل مختلف مهم و ضروری است و باید با روش‌های مختلفی که قابل کاربرد در زیردریایی باشد تا حد امکان اثر نامطلوب آن را کاهش داد.

شکل (۱) شماتیکی از نحوه تشکیل گردابهٔ نعل‌اسبی را نشان می‌دهد که در اثر اتصال برجک (مانع) به بدنهٔ زیردریایی ایجاد شده است. حضور برجک در مقابل جریان باعث ایجاد گرادیان فشار مخالف می‌شود. در این حالت، در لایهٔ مرزی روی بدنه در بالادست برجک، گردابهٔ عرضی تشکیل می‌شود. این گردابه در جهت حرکت به جلو مجبور به چرخش و دورزدن برجک می‌شود. در نتیجه گردابه‌ای موسوم به گردابهٔ نعل‌اسبی در دو طرف برجک تشکیل می‌شود که در امتداد طول زیردریایی تا منطقهٔ پاشنه و پروانه ادامه می‌یابد. عوامل مختلفی مانند ضخامت برجک، ضخامت جابه‌جایی لایهٔ مرزی (δ^*)، عدد رینولدز و صافی سطح می‌توانند بر گردابهٔ نعل‌اسبی تأثیرگذار باشند [2].



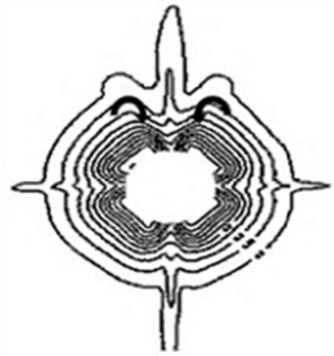
شکل ۱ شماتیکی از نحوهٔ تشکیل گردابهٔ نعل‌اسبی در اطراف برجک بر روی بدنهٔ زیردریایی [3]

اضافه شدن برجک به بدنهٔ یک زیردریایی، با ایجاد گرادیان فشار و افزایش سطح خیس، باعث افزایش درگ می‌شود و مقداری از انرژی هم صرف تولید گردابه خواهد شد. این گردابه بعد از تشکیل به سمت پایین‌دست برجک پیش می‌رود و در قسمت انتهای پاشنهٔ زیردریایی وارد جریان پروانه می‌شود و آشفتگی‌هایی در جریان پروانه ایجاد می‌کند. بنابراین جریان ورودی به پروانه با ضربهٔ اغتشاشی و حرکت گردابه‌ها همراه می‌باشد. اگر پروانه در چنین میدان جریانی کار کند، بار روی پره‌ها در جهت محیطی تغییر می‌کند و نیروی جلوبرنده و ضربات گشتاوری زیادی تولید می‌شود و به‌تبع آن لرزش و نویز پروانه افزایش می‌یابد. بسیاری از عملیات‌ها و مانورهای زیردریایی باید مخفیانه صورت گیرد اما نویز لرزش پروانه باعث شناسایی سریع آن می‌شود. بنابراین باید تا حد ممکن نویز پروانه به کمک ابزارهای مختلف کاهش داده شود.

با به‌کار بردن تجهیزات مختلف می‌توان نویزهای ایجاد شده را تا حد زیادی کم کرد اما یکی از راه‌های مفید برای بهبود عملکرد هیدرودینامیکی زیردریایی، کنترل دنبالهٔ جریان قسمت‌های جانبی زیردریایی است. کاهش اندازه و قدرت گردابهٔ نعل‌اسبی جزو یکی از روش‌های افزایش راندمان پروانه و کاهش نویز زیردریایی است.

پدیده‌شناسی گردابه‌های مختلف تشکیل شده در اطراف بدنه و قسمت‌های جانبی یک وسیلهٔ زیرسطحی، مورد توجه محققان زیادی بوده است. سعیدی نژاد و همکاران [٤] با استفاده از روش مرئی‌سازی دود و نور لیزر، گردابه‌های جریان عرضی را بر روی بدنهٔ یک مدل زیردریایی بررسی کردند. هووانگ و همکاران [5] با قرار دادن یک مدل زیردریایی سابوف (SUBOFF) به‌همراه برجک و کلیهٔ متعلقات بدنه در تونل باد، دنبالهٔ مدل را در محل پروانه در عدد رینولدز $Re= ۱۲ \times ۱۰^{٦}$ اندازه‌گیری کردند. شکل (۲) کانتور سرعت محوری دنباله تولید شده در محل پروانه را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود در محل دنبالهٔ برجک (قسمت بالایی)، گردابهٔ نعل‌اسبی میدان دنبالهٔ آشفتگی بیشتری ایجاد کرده است.

جریان اطراف یک مدل زیردریایی با بدنه متقارن همراه با برجک توسط لیو و همکاران [3] مورد مطالعه قرار گرفت. در این تحقیق پیشنهاد شد که به‌منظور از بین بردن گردابهٔ نعل‌اسبی از یک وسیلهٔ منشوری استفاده شود که در پائین‌دست راستای گردابه‌های نعل‌اسبی برجک زیردریایی نصب می‌گردد. استفاده شود. پس از انجام مطالعات عددی با نصب مدل زیردریایی در تونل باد مادون صوت، با استفاده از سرعت‌سنج سیم داغ سرعت محوری جریان در منطقهٔ پاشنه را اندازه‌گیری و نتایج عددی را با نتایج تجربی مقایسه کردند. نتایج حاصل در هر دو توافق خوبی با یکدیگر داشتند. نتایج نشان داد که اثر این وسیلهٔ کوچک نسبت به مکان قرارگیری آن بر روی بدنهٔ زیردریایی و در پشت برجک، بسیار حساس است و باید به‌صورت دقیق تعیین شود.



شکل ۲ کانتور میدان سرعت محوری دنباله اندازه‌گیری شده در محل پروانه (هووانگ و همکاران [5])

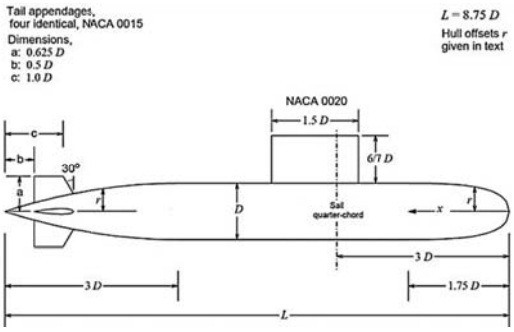
مرور تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که از پراب پنج حفره برای بررسی میدان‌های گردابه‌ای استفاده شده است. میزلند و همکاران [6] جریان اطراف یک نوع بال دلتای دوگانه را به‌صورت عددی و تجربی مطالعه کردند. آنها به‌منظور اعتبارسنجی کد عددی تهیه شده برای تحلیل میدان جریان بال دلتای دوگانهٔ مورد نظر، از یک پراب پنج حفره با زاویهٔ رأس ٤٥ درجه استفاده کردند. با استفاده از این روش جریان‌های گردابی ایجاد شده بر روی بال مذکور اندازه‌گیری و نتایج با یکدیگر مقایسه شدند. بلومهوف [7] به‌منظور مشاهدهٔ تغییرات جریان دنبالهٔ توربین بادی، یک مدل توربین بادی را داخل تونل باد قرار داد و به‌وسیلهٔ یک پراب پنج حفره جریان دنبالهٔ توربین بادی را در مقاطع مختلف اندازه‌گیری کرد و پارامترهای گوناگون را نیز مورد سنجش قرار داد.

همان‌گونه که گفته شد، گردابهٔ نعل‌اسبی ناشی از برجک زیردریایی باعث غیریکنواختی جریان ورودی به پروانه و در نتیجه کاهش عملکرد پروانه و افزایش نویز آن می‌شود. از این‌رو بررسی عملکرد این گردابه و تغییر آن در اثر عوامل مختلف دارای اهمیت است و باید تا حد امکان اثر نامطلوب آن کاهش داده شود.

یکی از عواملی که می‌تواند در کنترل گردابهٔ نعل‌اسبی تأثیر گذار باشد، تغییرمکان قرارگیری برجک بر روی بدنهٔ زیردریایی است. با تغییر مکان برجک بر روی بدنهٔ زیردریایی اندازهٔ لایهٔ مرزی برخورد کننده به برجک تغییر می‌کند، در نتیجه تغییرمکان برجک در امتداد طولی بر روی بدنهٔ زیردریایی بر گردابهٔ نعل‌اسبی نیز تأثیر خواهد گذاشت. از این‌رو در این تحقیق با توجه به اثر نامطلوب گردابه‌های نعل‌اسبی بر روی جریان دنبالهٔ زیردریایی سعی شده است تا با یک روش تجربی نوآورانه محل گردابهٔ نعل‌اسبی با استفاده از یک پراب پنج حفره بررسی شود. با توجه به مرور کارهای گذشته، تا اکنون در هیچ تحقیقی از یک پراب فشار چند حفره برای بررسی گردابهٔ نعل‌اسبی در محل اتصال برجک به بدنهٔ زیردریایی در تونل باد استفاده نشده است. قابل ذکر است که سیستم کالیبراسیون پراب پنج حفره توسط محققان طراحی و ساخته شده است.

تجهیزات و روش آزمایش

مدل آزمایشگاهی. در این تحقیق از یک مدل زیردریایی استاندارد برای بررسی اثر جابه‌جایی برجک این زیردریایی بر گردابهٔ نعل‌اسبی استفاده شده است. این مدل زیردریایی استاندارد توسط پژوهشگاه وزارت دفاع کانادا (Defense Research & Development Canada (DRDC)) و پژوهشکدهٔ دریایی هلند (Marine Institute Netherlands) در سال ۱۹۸٤ برای انجام یک سری آزمایش‌های مشخص طراحی شد [8]. تحقیقات زیادی حول محور بررسی مانورهای زیردریایی (نیروها و ممان‌های وارد بر آن) به‌صورت آزمایشگاهی در تونل باد و حوضچهٔ کشش در آزمایشگاه‌های مختلف انجام شده است. بدنهٔ این مدل دارای سه قسمت دماغه، بدنهٔ میانی و قسمت انتهایی (پاشنه) می‌باشد. متعلقات دیگر این مدل نیز عبارتند از برجک و بالک‌های عقبی. شکل شماتیکی مدل زیردریایی استاندارد به‌همراه ابعاد بدون بعد آن در شکل (۳) نشان داده شده است. نسبت طول به قطر برای این مدل $L/D = ۸/۷۵$ می‌باشد. پروفیل مقطع برجک همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده است، به‌صورت یک ایرفویل ناکا ۰۰۲۰ (NACA 0020) است که طول وتر آن $L_s = ۱۲۷$ mm می‌باشد. مدل مورد استفاده در این تحقیق با طول کلی $L = ۷۰۰$ mm براساس ابعاد مدل استاندارد از جنس آلومینیوم و بوسیله دستگاه سی‌ان‌سی ساخته شده است. مدل ساخته‌شده دارای دقت ابعادی و صافی سطح بسیار خوبی است. بر روی سطح بالایی مدل سوراخ‌هایی تعبیه شده تا به‌کمک آنها بتوان مکان برجک بر روی مدل را در جهت طولی تغییر داد. در شکل (٤) نحوهٔ قرارگیری مدل داخل تونل باد نشان داده شده است.



شکل ۳ مدل زیردریایی استاندارد کانادایی همراه با برجک و سطوح کنترلی [8]



شکل ٤ نحوهٔ قرارگیری مدل زیردریایی به‌همراه برجک داخل اتاق آزمون تونل باد

تونل باد و دستگاه فشارسنج. تمامی آزمایش‌های این تحقیق در تونل باد مدار بسته دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان انجام شده‌اند. این تونل باد دارای حداکثر توان فن ۳۲ Kw و حداکثر سرعت ۳۰ m/s در داخل اتاق آزمون می‌باشد. اتاق آزمون این تونل باد دارای سطح مقطع mm^2 ۳۸۰×۲۸۰ و طول آن ۷۰۰ mm است و دارای دو پنجره از جنس شیشه پلکسی شفاف می‌باشد. برای جلوگیری از تداخل لایه‌مرزی‌های ایجاد شده توسط دیواره‌های جانبی، بین دو دیوار گوشه‌هایی با زاویهٔ ٤٥ درجه نصب شده است. اندازهٔ این گوشه‌ها در امتداد اتاق آزمون کوچک می‌شود و این باعث بزرگ شدن سطح مقطع اتاق آزمون شده و تا حدودی اثر شناوری طولی در امتداد اتاق آزمون را از بین می‌برد. ضریب انسداد مدل به‌علاوهٔ پایهٔ نگهدارندهٔ آن در اتاق آزمون تونل باد برابر ٤/٩٪ است. این مقدار کمتر از مقدار استاندارد (٥ ٪) است و لذا قابل‌اطمینان است. تمامی آزمایش‌های این تحقیق در سرعت m/s ۱٦ انجام می‌شود. شدت اغتشاش‌های اتاق آزمون در این سرعت حدود ۰/۲٥ درصد می‌باشد.

برای استفاده از پراب پنج حفره احتیاج به اندازه‌گیری پنج کانال فشار است. به این منظور از یک دستگاه مبدل فشار ۱٥ کاناله استفاده می‌شود. سنسورهای فشار این دستگاه قادر به اندازه‌گیری حداکثر فشار دیفرانسیلی ۱۲۷۰ Pa ± با دقت ۳ Pa ± می‌باشند. داده‌های اندازه‌گیری شده به‌صورت مستقیم از طریق یک کارت مبدل ولتاژ آنالوگ به دیجیتال ۱۲ بیتی وارد رایانه و نرم‌افزار شده و محاسبات لازم روی آن‌ها انجام می‌شود. با توجه به روابط پراب پنج حفره مقادیر عدم قطعیت نسبی برای فشار و سرعت متوسط به‌ترتیب برابر ۷/۸ و ۱٦ درصد به‌دست آمده است.

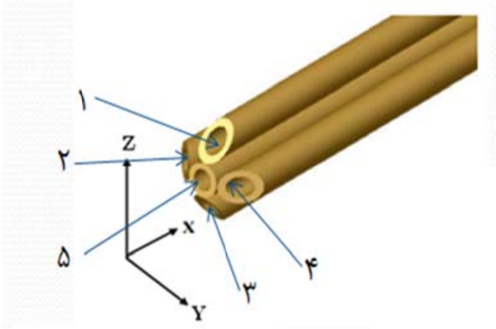
معرفی پراب پنج حفره و کالیبراسیون آن. پراب‌های چند حفره یکی از وسایل آزمایشگاهی برای تعیین مشخصه‌های جریان می‌باشند. استفاده از پراب‌های چند حفره از دههٔ دوم قرن ۲۰ شروع شد و تا اکنون نیز ادامه دارد. از این پراب‌ها نه تنها در محیط آزمایشگاه بلکه در هواپیماها و بالگردها نیز استفاده می‌شود. پراب‌های چند حفره به‌منظور تعیین مؤلفه‌های سرعت جریان، جهت جریان و فشار کل مورد استفاده قرار می‌گیرند. از این پراب می‌توان برای بررسی میدان‌های گردابه‌های سه‌بعدی استفاده کرد. برای بررسی چنین جریانی به‌طور کلی می‌توان از چهار روش اندازه‌گیری استفاده کرد. این چهار روش اندازه‌گیری شامل (PIV (Particle Image Velocimetry، (LDV (Laser Doppler Velocimetry، جریان‌سنج سیم داغ (Hotwire Anemometry) به‌همراه یک پراب سه‌بعدی و استفاده از پراب‌های چند حفره فشار می‌باشد. روش‌های اندازه‌گیری PIV و LDV اگرچه دارای دقت بالایی هستند اما بسیار پیچیده و پرهزینه هستند. تا زمان چاپ این مقاله، هیچ اندازه‌گیری تجربی برای مشاهده گردابهٔ نعل اسبی بر روی بدنهٔ زیرسطحی به‌کمک روش‌های اندازه‌گیری PIV و LDV انجام نشده است. هم‌چنین استفاده از جریان‌سنج سیم داغ سه‌بعدی علاوه بر پیچیدگی فراوان و هزینهٔ بالای آن به‌دلیل آسیب دیدن پراب این جریان‌سنج در فواصل نزدیک به سطح بسیار مشکل است. مزایای یک پراب پنج‌حفره در اندازه‌گیری میدان جریان به‌صورت زیر قابل بیان می‌باشند:

۱- تعیین سه مولفهٔ سرعت و مشخص شدن میدان جریان سه‌بعدی
۲- تعیین فشار سکون و استاتیک جریان همزمان با اندازه‌گیری مؤلفه‌های سرعت (روش PIV و LDV و جریان‌سنج سیم داغ قادر به اندازه‌گیری فشار نیستند)
۳- عدم آسیب‌پذیری در نزدیکی سطح مدل
٤- دقت نسبتاً خوب و هزینهٔ کم و سادگی استفاده

با توجه به مزایای پراب پنج‌حفره نسبت به روش‌های اندازه‌گیری دیگر، در تحقیق حاضر از یک

پراب پنج‌حفره برای بررسی میدان گردابه‌ای سه‌بعدی استفاده شده است.

اصول عملکردی این پراب‌ها بر اساس توزیع فشار بر روی سطح جلویی یک جسم مدور می‌باشد که در جریان سیال قرار داده شده است. توزیع فشار بر روی سطح دارای یک مقدار ماکزیمم در نقطه سکون جریان است و مقدار فشار با حرکت به‌سمت پایین‌دست بر روی سطح مدل کاهش می‌یابد. برای اجسام گرد فشار ماکزیمم، همان فشار کل p_0 است که از مجموع فشار استاتیک (p_∞) و فشار دینامیکی (q) دور از جسم به‌دست می‌آید و کمترین میزان فشار در آن نواحی که شیب جسم موازی با راستای جریان آزاد قرار گیرد، اتفاق می‌افتد. با توجه به این نکته می‌توان با اندازه‌گیری فشار نقاط مختلف بر روی سطح یک جسم مدور، زاویهٔ جریان نسبت به جسم را تعیین کرد. جریان روی سطح گرد غالباً جدا می‌شود و جدایش جریان تغییراتی در توزیع فشار محلی ایجاد می‌کند و یک گرادیان فشار مخالف در جاهایی که شیب سطح در حال کاهش باشد، ایجاد می‌شود. اما برای استفاده از پراب چند حفره فرض می‌شود که در موقعیت‌های جریان موضعی، مکان انحراف زیاد جریان و یا مکان گرادیان زیاد سرعت در مقایسه با اختلال های پیش آمده در حضور پراب ناچیز است و از آنها صرف‌نظر می‌شود. این فرضیات اجازه می‌دهند تا پراب‌های چند حفره برای اندازه‌گیری سرعت و فشار در هر نقطه از جریان در نظر گرفته شوند. پرابی که برای مطالعهٔ تجربی حاضر در نظر گرفته شده از پنج لولهٔ فلزی با قطر خارجی ۱ mm تشکیل شده است. تصویر کلی از این پراب در شکل (۵) نشان داده شده است. این لوله‌ها با زاویهٔ ٤٥ درجه قطع شده و در کنار همدیگر قرار داده شده‌اند.



شکل ۵ طرح کلی پراب پنج حفره مورد استفاده به‌همراه شماره‌گذاری سوراخ های آن

یک پراب پنج حفره قبل از استفاده باید کالیبره شود. کالیبراسیون به این معناست که روابط بین فشارهای اندازه‌گیری شده توسط پراب و زوایای جریان در مکان اندازه‌گیری به‌دست آیند. این روابط به‌صورت ضرایب بی‌بعد استخراج می‌شوند که با توجه به زاویهٔ جریان می‌توان از آنها استفاده کرد. بعد از فرایند کالیبراسیون، باید اندازه‌گیری پنج فشار مربوط به پنج حفرهٔ پراب جهت تعیین زاویه جریان باید انجام شود. برای کالیبراسیون از جریان هوای یک تونل باد مدار باز استفاده شده است. با استفاده از توری و لانه‌زنبوری در این تونل باد از یکنواخت بودن جریان آن اطمینان حاصل شده است. در این تحقیق برای کالیبره نمودن پراب پنج حفره، از موارد زیر استفاده شده است: ۱) مکانیزم زاویه دهندهٔ پراب، ۲) جریان مستقیم ایجاد شده در اتاق آزمون تونل باد، ۳) دستگاه اندازه‌گیری فشار، ٤) نرم‌افزار اخذ داده‌ها. در شکل (٦) تجهیزات کالیبراسیون پراب پنج حفره مشخص شده است. شکل (٦- الف) پراب پنج حفره، (٦- ب) دستگاه اندازه‌گیری فشار (مبدل فشار ۱۵ کاناله) و (٦- ج) مکانیزم زاویه دهنده پراب نشان داده شده است.

مقادیر فشارهای پراب اخذ شده و با استفاده از فشار استاتیک و کل به‌دست آمده از یک پراب پیتوت اعداد بدون‌بعد حاکم به‌دست می‌آیند. این عمل برای زوایای مختلف پیچ و یاو تکرار می‌شود. در نهایت

منحنی کالیبراسیون حاکم بر پراب براساس چهار پارامتر پیچ و یاو و ضرایب بدون‌بعد به‌دست خواهد آمد.



شکل ٦ تجهزات مورد استفاده در کالیبراسیون پراب پنج حفره الف) پراب پنج حفره، ب) دستگاه اندازه‌گیری فشار (مبدل فشار ۱۵ کاناله) و ج) مکانیزم زاویه دهنده پراب

برای این‌که بتوان زوایای پیچ و یاو را به فشارهای خوانده شده توسط سوراخ‌های مختلف ربط داد، نیاز است تا ضرایب بدون‌بعد فشار تعریف شوند. برای تعریف ضرایب بدون بعد فشار چند روش وجود دارد. در این تحقیق از روابط ارائه شده توسط تراستر و یوکوم [9] استفاده شده است. ضرایب بدون‌بعد فشار به‌صورت رابطهٔ (۱) تعریف می‌شوند.

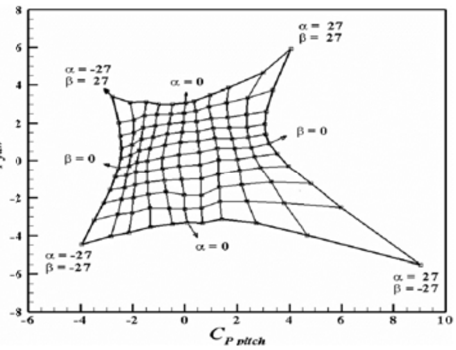
$$C_{p_\alpha}=\frac{p_1-p_3}{p_5-\overline{p}}$$
$$C_{p_\beta}=\frac{p_2-p_4}{p_5-\overline{p}}$$
$$C_{p_{total}}=\frac{p_5-p_{total}}{p_5-\overline{p}} \qquad (۱)$$
$$C_{p_{static}}=\frac{\overline{p}-p_{static}}{p_5-\overline{p}}$$
$$\overline{p}=\frac{(p_1+p_2+p_3+p_4)}{4}$$

در این روابط پارامترهای $C_{P\alpha}$ و $C_{P\beta}$ به‌ترتیب ضرایب فشار بی‌بعد برای زاویهٔ جریان در راستای قائم (پیچ) و راستای افقی(یاو) هستند که به‌واسطهٔ آنها می‌توان زوایای پراب را در مرحلهٔ کالیبراسیون و زوایای جریان را در مرحلهٔ بازیابی پارامترهای جریان به فشارهای سوراخ‌های پراب پنج حفره ارتباط داد. هم‌چنین پارامترهای C_{Ptotal} و $C_{Pstatic}$ به‌ترتیب ضرایب فشار بی‌بعد سکون و استاتیک هستند که به‌واسطهٔ این ضرایب می‌توان فشارهای سکون و استاتیک را در هر نقطه به‌دست آورد سپس با استفاده از دو فشار مذکور و به‌کمک رابطهٔ (۲) مقدار سرعت را در هر نقطه به‌دست آورد.

$$|V|=\sqrt{\frac{2(P_{tot}-P_{stat})}{\rho}} \qquad (۲)$$

به‌طور کلی فرآیند کالیبراسیون پراب پنج حفره به این صورت است که ابتدا پراب پنج حفره درون تونل باد مدار باز بر روی دستگاه زاویه‌دهندهٔ پراب نصب می‌شود و سوراخ‌های فشار پراب پنج حفره به‌دستگاه مبدل الکترونیکی فشار متصل می‌شوند. پس از آن با قرار دادن پراب در موقعیت‌های زاویه‌ای مختلف فشارها در هر موقعیت اندازه‌گیری می‌گردند و به‌کمک روابط ذکر شده در (۱) فشارها به ضرایب فشار بی‌بعد در هر نقطه تبدیل می‌شوند. پس از انجام فرآیند کالیبراسیون و به‌دست آوردن ضرایب بی‌بعد به شکلی که گفته شد ضرایب کالیبراسیون در یک منحنی به‌عنوان نتیجه رسم می‌شوند. منحنی حاصل به منحنی کالیبراسیون معروف است. در شکل (۷) نمودار کالیبراسیون به‌دست آمده از فرآیند کالیبراسیون پراب پنج حفره در سرعت جریان ورودی ١٦ m/s نشان داده شده است. پس از کالیبراسیون با قرار گرفتن پراب پنج حفره در جریان دلخواه در هر نقطه پنج فشار اندازه‌گیری می‌شود و سپس ضرایب بی‌بعد فشار با کمک روابط مربوط محاسبه می‌گردند؛ دو ضریب تشکیل یک نقطه را بر روی منحنی کالیبراسیون می‌دهند. با قرار دادن نقطهٔ مذکور بر روی منحنی

کالیبراسیون نزدیک‌ترین زوایا به‌عنوان نقاط حاشیه نقطهٔ مورد نظر انتخاب می‌شوند سپس می‌توان با استفاده از یک میان‌یابی خطی ساده مقدار دقیق زاویهٔ مربوط را به‌دست آورد. هم‌چنین با داشتن مقدار دقیق دو زاویه می‌توان با استفاده از اطلاعات مرحلهٔ کالیبراسیون مقادیر فشار سکون و استاتیک و در نتیجه مقدار سرعت را در نقطهٔ مورد نظر به‌دست آورد. کلیهٔ این مراحل با تهیهٔ یک برنامهٔ کامپیوتری توسط نویسندگان به‌صورت خودکار انجام شده است. این برنامه قادر است تا با دریافت اطلاعات مرحلهٔ کالیبراسیون و نیز دریافت یک فایل شامل داده‌های فشار در نقاط مورد آزمون، مقادیر فشار و مؤلفه‌های سرعت را به‌صورت یک فایل دادهٔ خروجی نمایش دهد. سپس با استفاده از نرم‌افزار تک‌پلات (Tecplot) نتایج مورد تحلیل قرار می‌گیرند.



شکل ۷ منحنی کالیبراسیون پراب پنج حفره

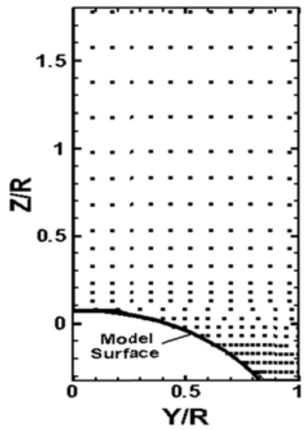
مراحل انجام آزمایش‌ها و بررسی نتایج

برای انجام آزمایش‌ها باید مدل زیردریایی در داخل اتاق آزمون تونل باد نصب شود. مدل بر روی پایهٔ نگهدارنده به‌صورت کاملاً تراز قرار داده می‌شود و اتصالات مورد نیاز در جای خود قرار می‌گیرند. پراب پنج حفره بر روی پایهٔ نگهدارندهٔ دستگاه منتقل کنندهٔ پراب نصب می‌شود. در شکل (۸) می‌توان نحوهٔ قرار گرفتن پراب پنج حفره را در کنار مدل مشاهده نمود.



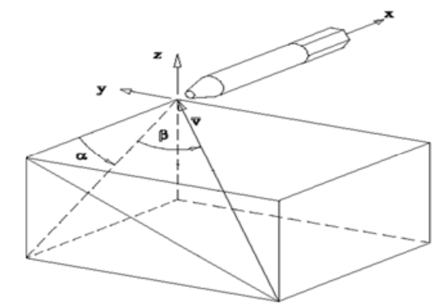
شکل ۸ نمایی از نحوهٔ قرار گرفتن پراب پنج حفره پشت برجک در داخل اتاق آزمون

پراب پنج‌حفره بر روی پایهٔ نگهدارندهٔ دستگاه انتقال‌دهنده نصب می‌شود. این دستگاه انتقال‌دهنده قادر است که پراب را در سه راستای مختصات با دقت بسیار مناسب (۰/۰۱ mm) جابه‌جا کند. پراب در میدان جریان پایین‌دست برجک مدل زیرسطحی قرار می‌گیرد. در حالی‌که تونل باد روشن است پراب توسط دستگاه جابجا کننده حرکت داده شده و در موقعیت‌های مختلف قرار گرفته و مقادیر فشار را در هر مکان ذخیره می‌کند. بازهٔ اندازه‌گیری میدان جریان پایین‌دست برجک در یک صفحه، عمود بر محور مدل (x ثابت) در شکل (۹) نشان داده شده است. مکان نقاط اندازه‌گیری داده‌های فشار پراب پنج‌حفره در این شکل با نقاط سیاه رنگ مشخص شده است. بعد از فرایند داده‌برداری از تمامی نقاط، داده‌های فشار شامل: پنج دادهٔ فشار مربوط به پراب پنج‌حفره و دو دادهٔ فشار مربوط به پراب پیتوت تیوب (Pitut tube) (که در ابتدای اتاق آزمون در جریان آزاد قرار دارد) برای هر نقطه (در شکل ۹) وارد نرم افزار کالیبراسیون می‌شوند. این نرم‌افزار مقادیر فشار کل و استاتیک و زوایای پیچ (α) و یاو (β) مربوط به هر نقطه (نقطهٔ سیاه‌رنگ در شکل ۹) را به عنوان خروجی در اختیار کاربر قرار می‌دهد. اکنون با داشتن فشار سکون و استاتیک برای هر نقطهٔ مورد آزمایش مقدار سرعت کل به‌کمک رابطهٔ (۲) قابل محاسبه است.



شکل ۹ بازهٔ اندازه‌گیری میدان جریان پایین‌دست برجک و مکان نقاط اندازه‌گیری (نقطه‌های سیاه) در یک صفحهٔ X ثابت

اکنون با داشتن زوایای α و β و مقدار سرعت کل، مـی‌تـوان مؤلفـه‌هـای سـرعت در جهـت محورهـای مختصات (u, v , w) را با توجه به شکل (۱۰) و روابط (۳) بدست آورد.

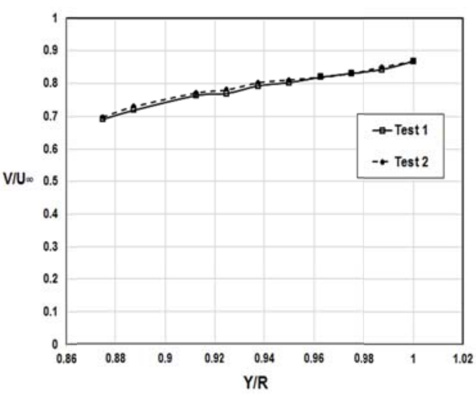


شکل ۱۰ نمایی از بردار سرعت کلی برخورد کننده به پراب پنج‌حفره و زوایای جریان

$$\begin{aligned} u &= V\cos\beta\cos\alpha \\ v &= V\sin\beta \\ w &= V\cos\beta\sin\alpha \end{aligned} \quad (۳)$$

مقادیر مختصات هر نقطه مورد آزمایش و مؤلفه‌ها و مقدار سرعت و هـم‌چنـین مقـادیر فشـارهای کـل و استاتیک که در هر نقطه محاسبه شده، در یک فایل داده در نرم‌افزار اکسل وارد می‌شوند؛ پس از این‌کـه تمـامی نقاط مورد آزمایش در این فایل ذخیره شدند، این فایل وارد نرم افزار تک‌پلات مـی‌شـود. بعـد از ورود فایـل داده‌ها به این نرم‌افزار، یک شبکه با المان‌های مثلثی بـر روی تمامی محیط اندازه‌گیری ایجاد می‌شود تا نرم‌افزار تک‌پلات قادر باشد مقـادیر پارامترهـای مختلـف را در مکان‌هایی که داده وجود ندارد، میان‌یابی کند. در انتهـا شبکه‌ای از مقادیر پارامترهای مختلف وجـود دارد کـه به‌کمک آنها می‌توان کانتور هـر پـارامترماننـد سـرعت متوسط را رسم کرد. هـم‌چنـین بـا داشـتن مؤلفـه‌هـای سرعت می‌توان بـه‌کمـک دسـتور بـردار در نـرم‌افـزار تک‌پلات بردارهای سـرعت را نیـز رسـم نمـود. بـرای بررسی صحت اندازه‌گیری‌های انجام‌شـده در مطالعـهٔ تجربـی حاضـر تکرارپـذیری نتـایج و تعیـین مقـادیر عدم‌قطعیت نتایج انجام شده است. در ادامه به بررسـی هر کدام از این قسمت‌ها پرداخته می‌شود.

بررسی تکرارپذیری نتایج. تکرارپـذیری آزمـایش‌هـا خود نشان دهندهٔ قابل اعتماد بودن نتایج اسـت کـه در این‌جا به‌عنوان نمونهٔ توزیع سرعت کـل (V) بـر روی یک خط مشـخص در فاصـلهٔ X/L= ۰/۶۲ از دماغـه و روی خط Z/R=۰/۳۲۵ و در فاصـلهٔ ۰/۸۷۵≤Y/R≤۱/۰ دو بار اندازه‌گیـری شـده و در شـکل (۱۱) نشـان داده شده است. همان‌طور کـه ملاحظـه مـی‌شـود اخـتلاف سرعت اندازه گیری‌شده برای دو آزمایش بسیار نـاچیز است و می‌توان نتیجه گرفت کـه آزمـایش‌هـای انجـام گرفته توسط محققین با دقت خوبی قابل تکرار هستند.



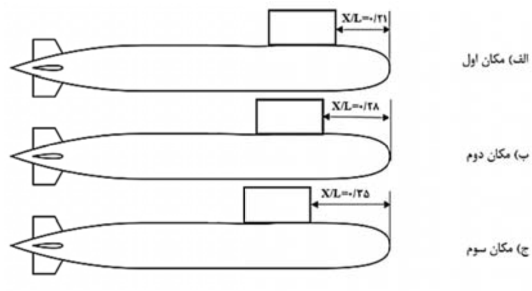
شکل ۱۱ مقایسهٔ توزیع سرعت کل (V) بر روی یک خط مشخص در فاصلهٔ X/L= ۰/۶۲ از دماغه و روی خط Z/R= ۰/۳۲۵ و در فاصلهٔ ۰/۸۷۵≤Y/R≤۱/۰

تعیین مقادیر عدم قطعیت پارامترهای اندازه‌گیری شده. مقادیر عدم‌قطعیت پارامترهای جریان سیال و نتایج پراب پنج حفره در جدول (۱) آورده شده است. همان‌گونه که در این جدول مشخص است، میزان عدم‌قطعیت نسبی پارامترهای اندازه‌گیری شده توسط پراب پنج‌حفره مناسب می‌باشند که نشان‌دهندهٔ دقت مناسب اندازه‌گیری‌های انجام شده می‌باشد.

جدول ۱ تعیین عدم‌قطعیت پارامترهای جریان سیال و نتایج پراب پنج‌حفره

پارامتر	مقدار عدم‌قطعیت نسبی $\frac{u_x}{x}$ (٪)
چگالی (kg/m^3)	۰/۸
فشار جریان (pa.)	۰/۰۶۳
سرعت جریان آزاد (m/s)	۰/٤
عدد رینولدز	۰/۷
زاویهٔ α	٤/۲
زاویهٔ β	٤/۲
سرعت کل V (m/s)	۸/۷
مؤلفهٔ سرعت u (m/s)	٤/۷
مؤلفهٔ سرعت v (m/s)	۹/۵
مؤلفهٔ سرعت w (m/s)	۱۰/۷

برای بررسی اثر موقعیت برجک بر گردابهٔ نعل‌اسبی، برجک مدل زیردریایی در سه موقعیت مختلف در نیمهٔ جلویی مدل قرار داده شده است. علت انتخاب نیمهٔ جلویی مدل محدودیت‌های طراحی برای ایجاد پایداری هیدرودینامیکی بیشتر زیردریایی است. این فاصله‌ها بر حسب فاصلهٔ لبهٔ حمله برجک از ابتدای دماغهٔ مدل و نسبت به طول کلی مدل سنجیده می‌شوند. پارامتر X فاصلهٔ لبهٔ حملهٔ برجک از دماغهٔ مدل و L طول مدل است. طول وتر برجک نسبت به طول مدل برابر با $L_s/L=$ ۰/۱۸ است. در شکل (۱۲) این فواصل آورده شده‌اند.



شکل ۱۲ طرح کلی مکان‌های مورد استفاده برای برجک بر روی مدل در تحقیق حاضر

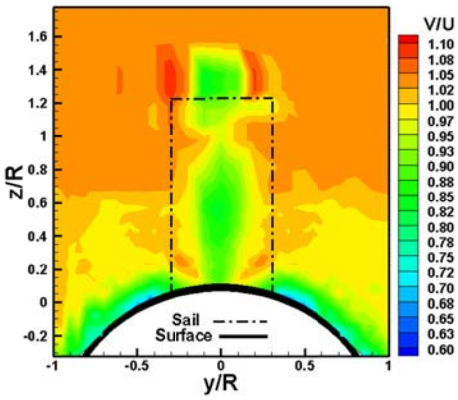
بررسی نتایج و تحلیل آنها

ارزیابی تقارن جریان اطراف مدل. در ابتدا برای بررسی تقارن جریان در دو طرف برجک، اندازه‌گیری‌ها در هر دو طرف برجک مدل به‌صورت یکسان انجام شده‌اند. در این حالت برجک در موقعیت X/L= ۰/۲۸ از نوک دماغه قرار دارد. در شکل (۱۳) کانتور سرعت متوسط بی‌بعد (الف) و بردارهای سرعت در صفحهٔ Y-Z (ب) در موقعیت X/L= ۰/۵۵ از نوک دماغه آورده شده است. با توجه به این شکل متقارن بودن رفتار جریان در دو طرف برجک مدل به جز منطقه نوک برجک (گردابه نوک) می‌توان مشاهده نمود. با اتکا به تقارن جریان در دو طرف برجک مدل، در مراحل بعدی تنها نتایج یک طرف برجک مدل بررسی می‌شوند.

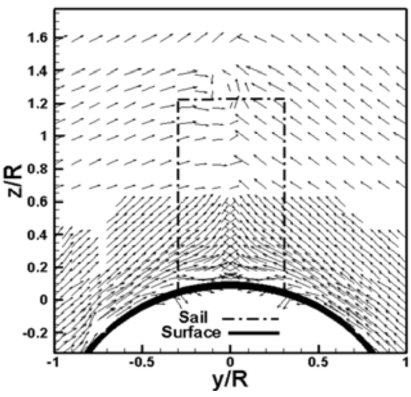
برای بررسی صحت اندازه‌گیری‌های انجام شده در این تحقیق در تعیین ساختار گردابهٔ نعل اسبی، میدان ورتیسیته در پایین‌دست برجک مدل زیردریایی سابوف همراه با برجک و سطوح کنترل حاصل از نتایج عددی مرجع [11] در شکل (١٤) ارائه شده است. نحوهٔ تشکیل و رشد گردابهٔ نعل اسبی با حرکت به‌سمت پایین‌دست برجک به‌وضوح در این شکل دیده می‌شود. با مقایسهٔ نتایج تحقیق حاضر شکل (۱۳) و نتایج عددی ارائه شده در شکل (١٤) می‌توان نتیجه گرفت

که نتایج تحقیق حاضر از نظر کیفی ساختار کلی گردابهٔ نعل اسبی را به‌درستی نشان می‌دهد.

در شکل (۱۵) نمودار سرعت متوسط در چند فاصلهٔ عمودی از سطح (Z/R) آورده شده است (موقعیت برجک ۰≤Z/R≤۱/۲۵). همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود نمودارهای سرعت محوری در محل گردابهٔ نعل‌اسبی (Y/R = ± ۰/۵) دارای یک مقدار مینیمم است. با فاصله گرفتن از سطح مدل اثر گردابهٔ نعل‌اسبی کم می‌شود تا این‌که در موقعیت Z/R=۰/۳۲۵ اثر گردابهٔ نعل‌اسبی بر میدان جریان اطراف مدل از بین می‌رود. هم‌چنین با توجه به این نمودار می‌توان تقارن جریان را مشاهده نمود. روند این شکل با آنچه در نتایج لیو و همکارانش [3] آمده است هم‌خوانی خوبی دارد.

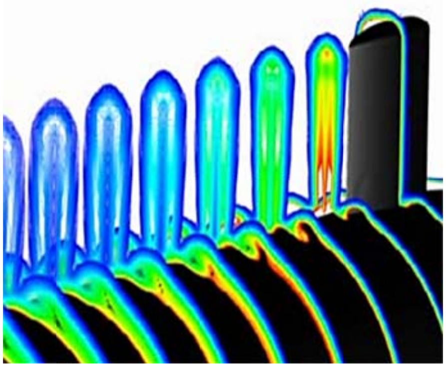


(الف)

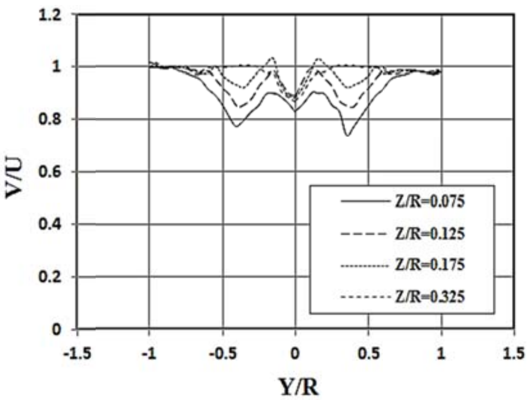


(ب)

شکل ۱۳ الف) کانتور سرعت متوسط ب) بردارهای سرعت در موقعیت X/L= ۰/۵۵ از نوک دماغه



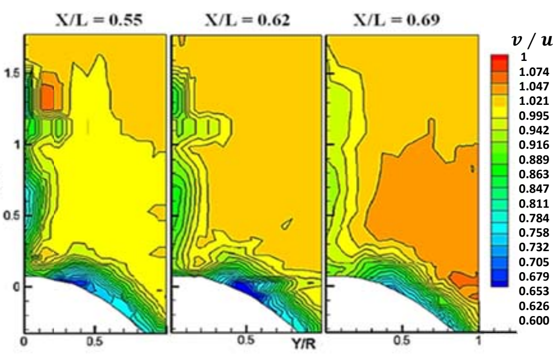
شکل ١٤ بررسی عددی میدان ورتیسیته پایین دست برجک مدل زیردریایی سابوف [11]



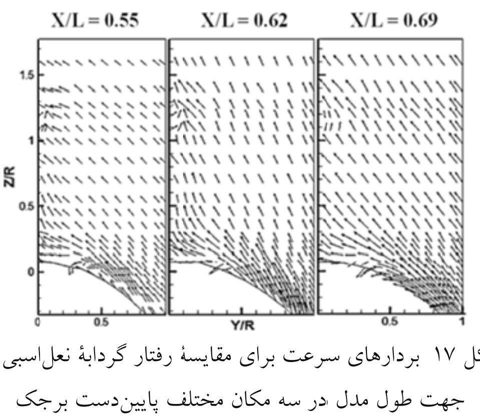
شکل ۱۵ نمودار سرعت متوسط در چند فاصله عمودی از سطح

در این مرحله برای بررسی گردابهٔ نعل‌اسبی در حالی که مدل هیچ‌گونه زاویهٔ حمله و زاویهٔ جانبی نداشته است، برجک در مکان سوم (X/L= ۰/۳۵) قرار داده شده و پراب در سه موقعیت طولی جابه‌جا شده و پس از آن در مکان ثابت پراب برجک در سه مکان جابه‌جا شده است و نتایج به‌صورت کانتور سرعت متوسط و کانتور فشار آورده شده است. پس از آن مدل در زاویهٔ حملهٔ ۱۰/۵ درجه قرار گرفته و یک مرحله بدنهٔ بدون برجک و در مرحلهٔ دیگر برای مکان ثابت پراب سه بار برجک جابه‌جا شده است. در تحلیل نتایج کلیهٔ مراحل اندازه‌گیری برای بی‌بعدسازی سرعت‌ها از سرعت جریان آزاد ١٦ m/s استفاده شده است.

نحوهٔ تغییر گردابهٔ نعل‌اسبی در جهت طول مدل برای یک مکان ثابت برجک. در این بخش رفتار گردابهٔ نعل‌اسبی در راستای مدل و در جهت جریان مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور نتایج اندازه‌گیری جریان توسط پراب پنج حفره در میدان جریان اطراف مدل برای سه موقعیت مختلف طولی ۰/۶۹ و ۰/۶۲ و X/L= ۰/۵۵ بررسی شده است. در این حالت برجک در موقعیت ثابت X/L= ۰/۳۵ قرار داده شده است. در شکل‌های (۱۷ و ۱۶) کانتور سرعت متوسط بی‌بعد و بردارهای سرعت در موقعیت‌های مختلف آورده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود با حرکت گردابهٔ نعل‌اسبی به‌سمت پاشنهٔ مدل مقدار سرعت متوسط در محل این گردابه افزایش یافته و این گردابه اگرچه از نظر اندازه بزرگ‌تر شده است، ولی قدرت آن کمتر شده است. این مطلب در مراجع دیگر از جمله [8] نیز تأیید شده است.

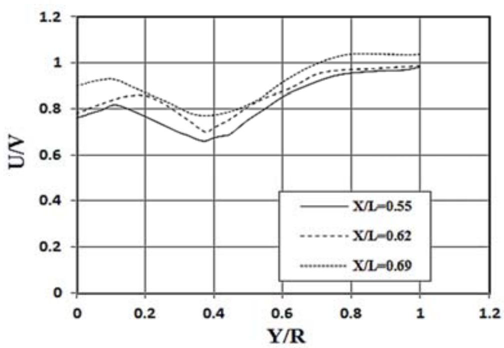


شکل ۱۶ کانتور سرعت متوسط برای مقایسهٔ رفتار گردابهٔ نعل‌اسبی در جهت طول مدل در سه مکان مختلف



شکل ۱۷ بردارهای سرعت برای مقایسهٔ رفتار گردابهٔ نعل‌اسبی در جهت طول مدل در سه مکان مختلف پایین‌دست برجک

برای مقایسهٔ بیشتر برای سه موقعیت مذکور نمودار سرعت متوسط برای فاصلهٔ عمودی از سطح Y/R= ۰/۰۷۵ نیز در شکل (۱۸) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش فاصله از برجک، میزان سرعت متوسط نیز افزایش یافته است. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود با حرکت گردابهٔ نعل‌اسبی به سمت انتهای مدل، نقطهٔ مینیمم در این نمودار اندکی به سمت راست جابه‌جا شده یا به‌عبارت دیگر گردابه مقداری از مرکز مدل فاصله گرفته است.

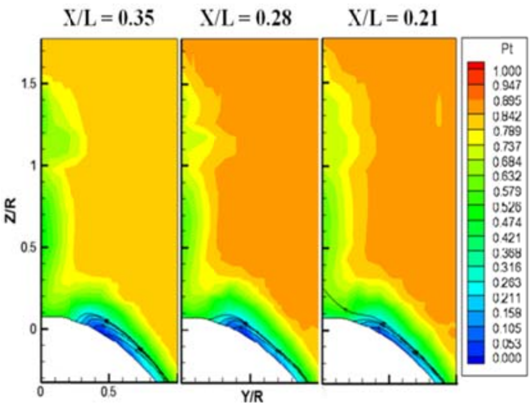


شکل ۱۸ نمودار سرعت متوسط برای سه مکان مختلف در خط Z/R= ۰/۰۷۵ و در پشت برجک (برجک در موقعیت ۰/۳۵ X/L=)

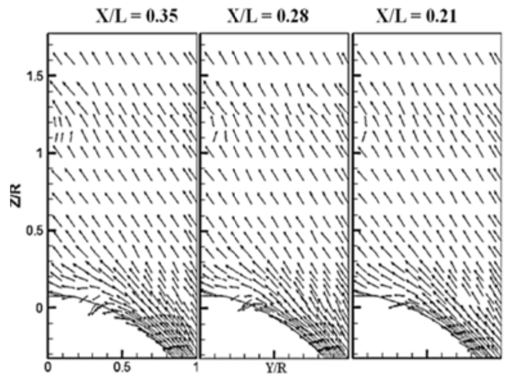
بررسی تأثیر جابه‌جایی برجک بر گردابهٔ نعل‌اسبی در موقعیت‌های ۰/۲۱، ۰/۲۸ و X/L= ۰/۳۵. در این بخش پراب در موقعیت X/L= ۰/۶۹ از نوک دماغه قرار دارد، برجک در سه موقعیت ۰/۲۱، ۰/۲۸ و ۰/۳۵ X/L= جابه جا شده و نتایج آن در زیر آورده شده است. در شکل (۱۹) کانتور نتایج هر سه آزمون در کنار هم قرار داده شده است. هم‌چنین در شکل (۲۰) بردارهای سرعت برای سه مکان مختلف برجک آورده شده است. شکل‌ها به‌ترتیب از راست به چپ مربوط به مکان برجک در موقعیت‌های ۰/۲۱، ۰/۲۸ و X/L= ۰/۳۵ هستند. از روی این شکل می‌توان دید که از نظر موقعیت مکانی گردابهٔ نعل‌اسبی برای برجک در

مکـان X/L= ۰/۲۱ از نظـر موقعیـت عرضـی بـین ۰/۵۵ ≥ Y/R ≥ ۰/۳۵، بـرای برجـک در مکـان ۰/۲۸ X/L= بـین ۰/۵۵ ≥ Y/R ≥ ۰/۳۵ و بـرای برجـک در مکان X/L= ۰/۲۸ بین موقعیت عرضـی ۰/٦ ≥ Y/R ≥ ۰/۳۵، است. هم‌چنین می‌توان مرکز گردابهٔ نعل‌اسبی را در مکان اول برجک در Y/R= ۰/٤۵، بـرای مکـان دوم در Y/R= ۰/٤ و بـرای برجـک در مکـان سـوم در Y/R= ۰/۳۵ مشاهده نمود. با تحلیل نتایج فوق می توان نتیجه گرفت که میزان گردابهٔ نعل‌اسبی از نظر اندازه در حالتی که برجک در مکان سـوم (X/L= ۰/۳۵) قـرار دارد، بزرگ‌تر است.

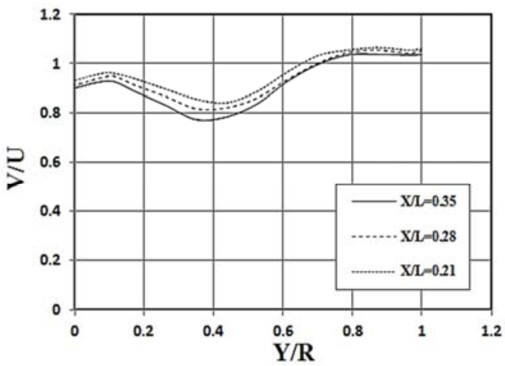
برای مقایسهٔ دقیـق‌تـر نتـایج بـرای سـه موقعیـت برجک مقادیر سرعت متوسط در فاصـلهٔ Z/R= ۰/۰۷۵ از سطح در شکل (۲۱) آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر سرعت متوسـط بـه‌طـور کلـی برای حالتی که برجک در موقعیت سوم (X/L= ۰/۳۵) قرار دارد در نزدیکی منطقهٔ تشکیل گردابهٔ نعل‌اسـبی از دو حالت دیگر کمتر است. هم‌چنین مطابق با این شکل نقاط مینیمم با افزایش فاصله از برجـک از مرکـز مـدل دورتر شده‌اند و به این معنی است که مرکز گردابـه بـا افزایش فاصله از برجک به‌سمت طرفین مـدل حرکـت می‌کند.



شکل ۱۹ مقایسهٔ سرعت متوسط برای سه موقعیت برجک و پراب در X/L= ۰/٦۹



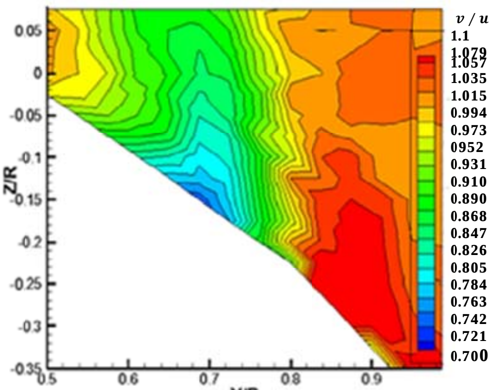
شکل ۲۰ مقایسهٔ بردارهای سرعت برای سه موقعیت برجک و پراب در X/L= ۰/٦۹



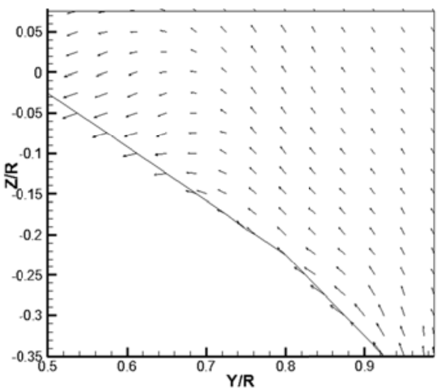
شکل ۲۱ نمودار سرعت متوسط برای سه موقعیت برجک در فاصله Z/R= ۰/۰۷۵ از سطح و پراب در X/L= ۰/٦۹

بررسی اثر موقعیت برجک در زاویهٔ حملهٔ ۱۰ درجه. شیزاوا و همکاران [12] یک بال استوانه‌ای با ضـخامت ثابت و دماغهٔ نیم‌دایره شکل را در زوایای حملـهٔ کمتـر از ۱۵ درجه مورد بررسی قرار دادند. آنها از مشـاهدات خود به این نتیجه رسیدند که به جز تغییرات اندکی که در ساق‌های گردابهٔ نعل‌اسبی ایجاد شده است، تغییرات دیگری نمی‌توان در گردابهٔ نعل‌اسبی مشاهده کرد. ایـن مشاهدات هم‌چنین توسط وود و وستفول [13] بر روی ایرفویل ناکا ۰۰۱۲ در زاویهٔ حملهٔ ۱۰ درجه انجام شد. نتایج آنها نیز گواه این مطلب بود که گردابهٔ نعـل‌اسـبی در اثر زاویهٔ حمله برای بال‌های مختلف تغییر چنـدانی نمی‌کند. اما در مدل زیردریایی وجود گردابه‌های بدنـه، که در اثر داشتن زاویهٔ حمله بر روی بدنـهٔ زیردریـایی به‌وجود می‌آید، بر روی گردابه‌های نعل‌اسبی نیز تـأثیر می‌گذارد. برای ارزیابی این موضوع مدل بدون اتصـال

برجک در زاویۀ حملۀ ۱۰/۵درجه قرار می‌گیرد و میدان جریان از جمله موقعیت گردابۀ بدنه توسط پراب پنج حفره مشخص می‌شود. سپس با حضور برجک بر روی مدل، اندازه‌گیری‌ها تکرار شده است. نتایج به‌صورت کانتور سرعت متوسط در شکل (۲۲- الف) و بردارهای سرعت (۲۲- ب) آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود گردابۀ بدنه در نزدیکی سطح بین ۰/۷۵ ≥ Y/R ≥ ۰/٦ دیده شده است و هم‌چنین پراب پنج حفره به‌دلیل نزدیکی به سطح چرخش جریان گردابی حاصل را نشان نداده است اما به‌طور کلی نحوۀ شکل‌گیری این جریان گردابی در میدان جریان اطراف مدل توسط بردارهای سرعت تولیدشده توسط پراب پنج حفره به‌خوبی قابل مشاهده است.



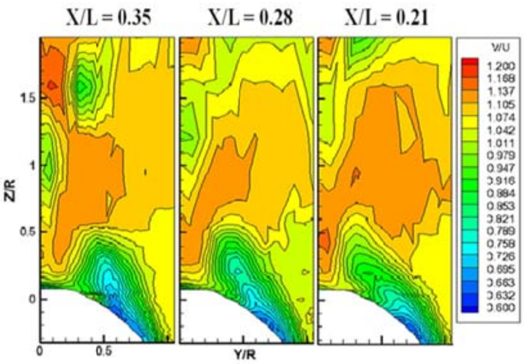
(الف)



(ب)

شکل ۲۲ الف) کانتور سرعت متوسط ب) بردارهای سرعت برای مدل بدون برجک در زاویۀ حملۀ ۱۰/۵ درجه

در شکل (۲۳) مدل در زاویۀ حملۀ ۱۰/۵ درجه قرار داشته و اندازه‌گیری‌ها در مکان X/L= ۰/٦۲ از نوک دماغۀ مدل برای سه حالت برجک رسم شده است. این شکل نشان می‌دهد که گردابۀ نعل‌اسبی از نظر اندازه و قدرت در حالتی که برجک در مکان سوم (X/L=۰/۳۵) قرار دارد، بیشتر است. هم‌چنین اندازۀ این گردابه در اثر زاویۀ مدل بزرگ‌تر و کشیده‌تر شده است.



شکل ۲۳ مقایسۀ سرعت متوسط برای سه مکان برجک با زاویۀ حملۀ ۱۰/۵درجه

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف از انجام این تحقیق بررسی اثر موقعیت طولی برجک مدل زیردریایی در جهت طولی بر روی میدان جریان اطراف آن در تونل باد بوده است. در اثر اتصال برجک به بدنۀ زیردریایی گردابۀ نعل‌اسبی به‌وجود می‌آید. بنابراین در طول مطالعۀ تجربی حاضر سعی شد تا با انجام آزمایش‌های مختلف گردابۀ مورد نظر اندازه‌گیری شود و تغییرات آن در اثر جابه‌جا نمودن محل برجک بر روی بدنه مشاهده و ثبت شود. برای اندازه‌گیری‌ها از یک پراب پنج حفره استفاده شد. در طول تحقیق برای استفاده از فناوری پراب‌های چند حفره یک پراب پنج حفره ساخته و در طی فرآیند کالیبراسیون، پراب مذکور کالیبره شد. با انجام تست‌های تجربی بر روی مدل نتایجی به شرح زیر به‌دست آمد:

- با انجام تست‌های تجربی مدل زیردریایی در تونل باد و استفاده از پراب پنج حفره میدان گردابه‌ای در اطراف تعیین و بردارهای سرعت در اطراف آن قابل بررسی هستند.
- در محل گردابه، مقدار سرعت نسبت به مقدار سرعت جریان آزاد عبور کرده از روی مدل کمتر است. با حرکت در امتداد جریان و در جهت طولی گردابهٔ مذکور ضعیف‌تر می‌شود و سرعت در محل آن افزایش می‌یابد.
- با جابه‌جا نمودن برجک تغییر گردابهٔ نعل‌اسبی مشاهده شد، هرچه برجک به سمت دماغه حرکت کند، گردابهٔ مذکور در مکان مشخص بر روی بدنه ضعیف‌تر می‌گردد.
- اثر جابه‌جایی طولی برجک بر روی جریان گردابی امتداد یافته به سمت انتهای مدل با داشتن زاویهٔ حمله در مدل مشاهده شد. هرچه برجک به‌سمت جلو نصب شود جریان گردابی مذکور نیز کوچک‌تر و ضعیف‌تر می‌شود. لذا از دیدگاه نویز شرایط بهتری برای مدل زیرسطحی فراهم می‌گردد.

فهرست علائم

$C_{P\alpha}$	ضریب فشار زاویهٔ پیچ
$C_{P\beta}$	ضریب فشار زاویهٔ یاو
C_{Ptot}	ضریب فشار کل
$C_{Pstatic}$	ضریب فشار استاتیک
D	قطر مدل
L	طول کلی مدل زیردریایی
L_S	طول کلی برجک (وتر برجک)
Ps	فشار استاتیک
P_T	فشار کل
$P_{1,2,3,4,5}$	فشارهای خروجی پراب پنج حفره
$\bar{P}$	متوسط فشارهای پراب پنج حفره
R	شعاع مدل
x,y,z	محورهای مختصات قرار گرفته در انتهای برجک روی بدنهٔ زیردریایی

علائم یونانی

α	زاویهٔ پیچ
β	زاویهٔ یاو

مراجع

۱. مونسان، محمد، «اصول طراحی زیردریایی»، انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر، بهار ۱۳۸۸.

2. Simpson, R.L., "Junction flows", Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 33, pp. 415- 443, (2001).

3. Liu, Z.H., Xiong, Y., Wang, Z.Z., Wang, S. and Tu, C.X., "Experimental study on effect of a new vortex control baffler and its influencing factor", China Ocean Engineering, Vol. 25, pp. 83-96, (2011).

٤. سعیدی نژاد، علی. دهقان، علی اکبر. دهقان منشادی، مجتبی. کاظمی اسفه، محمد، "بررسی تجربی ساختار گردابه‌ای روی یک مدل زیرسطحی"، مجلهٔ مهندسی مکانیک مدرس، دورهٔ ۱۳، شمارهٔ ۱۵، ص. ۹۸-۱۰۹، اسفند (۱۳۹۲).

5. Huang, T., Liu, H.L., Groves, N., Forlini, T., Blanton, J. and Gowing, S., "Measurements of flows over an axisymmetric body with various appendages in a wind tunnel: the darpa suboff experimental program", In Nineteenth Symposium on Naval Hydrodynamics, Seoul, Korea, (1992).

6. Maseland, J. and Verhaagen, N., "Experimental and numerical investigation of vortex flow over a 76/60-deg double-delta wing", Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering (1992).

7. Blomhoff, H.P., "An experimental investigation of wind turbine wakes", Msc thesis, Department of Energy and Process Engineering, Norwegian University of Science and Technology, (2002).
8. Mackay, M., and Defence, R., "The standard submarine model: a survey of static hydrodynamic experiments and semiempirical predictions", Defence R&D Canada-Atlantic, (2003).
9. Treaster, A.L. and Yocum, A.M., "The calibration and application of five-hole probes", ISA Transactions, Vol. 18, No. 3, (1979).
10. Gorski, J., "Marine vortices and their computation", NSWC, Carderock 9500 Macarthur Boulevardwest Bethesda, MD 20817-5700, USA, (2003).
11. Holmes, S., "Calculation of maneuvering forces on submarines using two viscous-flow solvers", Proceedings of ASME 29th International Conference on Ocean Engineering, June 6–11, (2010).
12. Shizawa, T., Honami, S. and Yamamoto, M., "Experimental study of horseshoe vortex at wing/body junction with attack", 34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA, Reno, NV., January 15-18, 1996.
13. Wood, D.H. and Westphal, Rv., "Measurements of the flow around a lifting-wing/body junction", AIAA J. 30:6–12, (1992).